



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

Comparison of implicit and explicit FSI coupling strategies in cardiovascular system

Damon Afkari^{*,**}, Felipe Gabaldón^{*} and Javier Rodríguez Soler^{**}

^{*}Universidad Politécnica de Madrid

^{**}PRINCIPIA S.A.

IV Reunión Capítulo Español ESB
Valencia, November 21st 2014



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Índice

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

1 Introduction

2 Models

3 Results

4 Conclusions



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Introducción

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

- Uno de los objetivos de la biomecánica computacional es obtener de las simulaciones resultados lo más realistas posibles con el mínimo tiempo de cálculo posible.
- Con este fin, en este trabajo se describe una metodología para simular el flujo sanguíneo considerando su interacción con la pared arterial, con las siguientes características:
 - Esquema de interacción alternado (staggered) con acoplamiento débil.
 - Condiciones de contorno realistas que incorporan los conceptos de autorregulación e impedancia del aparato circulatorio.



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Índice

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

1 Introduction

2 Models

3 Results

4 Conclusions



Modelos del flujo y de la pared arterial

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

- El flujo sanguíneo se modeliza considerando un fluido viscoso, newtoniano e incompresible, en régimen transitorio.
- Las ecuaciones de la dinámica (Navier-Stokes) se formulam con un esquema ALE.
- El modelo de flujo se resuelve con una técnica de volúmenes finitos, empleando el programa STAR-CCM+.
- El modelo de la pared se resuelve con Abaqus, considerando grandes deformaciones y el modelo constitutivo hiperelástico de Demiray:

$$W = \frac{a}{b} \left(\exp \left(\frac{b}{2} (I_1 - 3) \right) - 1 \right)$$

siendo I_1 el primer invariante del tensor derecho de Cauchy-Green, $a = 54,42$ kPa y $b = 1,15$ Pa.



Interacción fluido-estructura

La interacción flujo-pared arterial se define en la superficie que comparten ambos con las condiciones de transmisión:

$$\mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{u}}(t) = 0$$
$$\boldsymbol{\sigma}^f \mathbf{n}^f + \boldsymbol{\sigma}^s \mathbf{n}^s = 0$$

- Los métodos monolíticos en general son difíciles de formular y resolver.
- Dentro de los métodos alternados los esquemas de acoplamiento débil, aunque menos precisos, son bastante más eficientes que los basados en acoplamiento fuerte.
- Los métodos con acoplamiento débil son incondicionalmente inestables cuando:

$$\frac{\rho^f \lambda_{\max}}{\rho^s h^s} \geq 1, \quad \text{con } \lambda_{\max} = \frac{L}{\pi \tanh\left(\frac{\pi R}{L}\right)}$$



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Interacción fluido-estructura

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

- En este trabajo se utiliza una estrategia de acoplamiento débil, modificando el esquema convencional de acoplamiento explícito.
- La modificación consiste en despreciar las velocidades radiales de la pared en los pasos de tiempo en que se intercambia la información entre el fluido y la pared arterial.
- Se ha verificado que esta modificación no afecta sensiblemente a los resultados, ya que la velocidad de fluido aproximadamente dos ordenes de magnitud superior a la velocidad de la pared.
- No obstante esta metodología no permitiría representar correctamente, por ejemplo, el comportamiento viscoelástico de la pared arterial.



POLITÉCNICA

"Ingenieros el futuro"

FSI (comparación): mallas

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

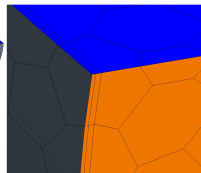
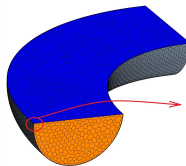
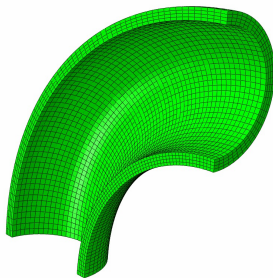
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingenieros el futuro"

FSI (comparación): BC's

FSI coupling strategies in cardiovascular system

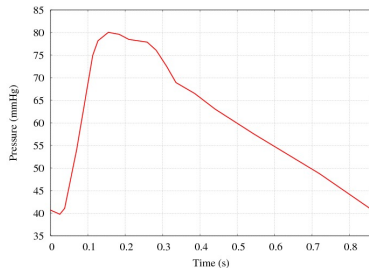
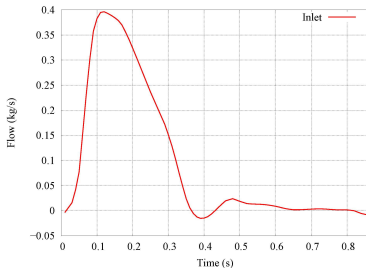
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

FSI (comparación): movimientos en la pared

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

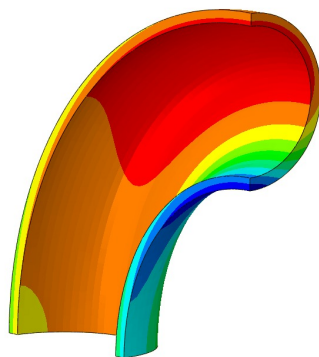
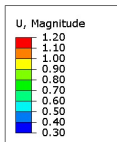
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniería y futuro"

FSI (comparación): movimientos en la pared

FSI coupling strategies in cardiovascular system

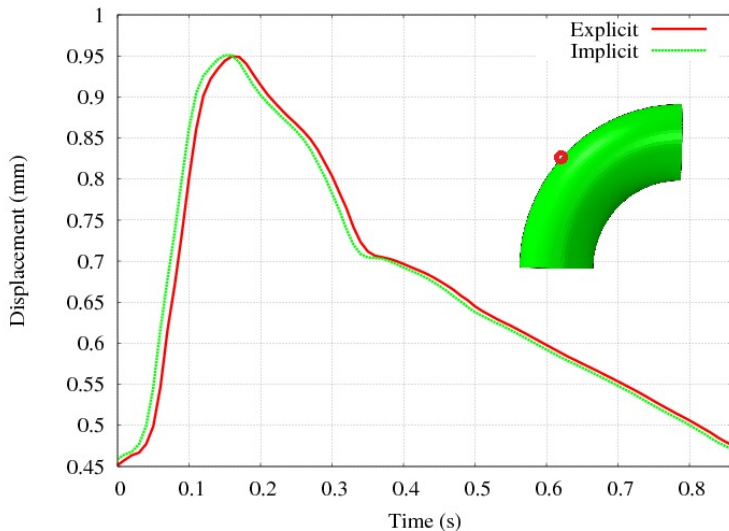
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

FSI (comparación): velocidad del fluido

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

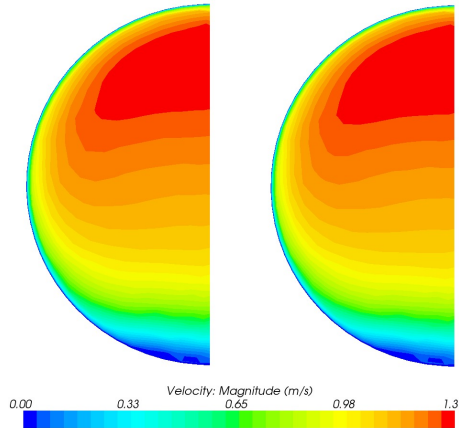
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions



Sección de salida



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

FSI (comparación): WSS

FSI coupling strategies in cardiovascular system

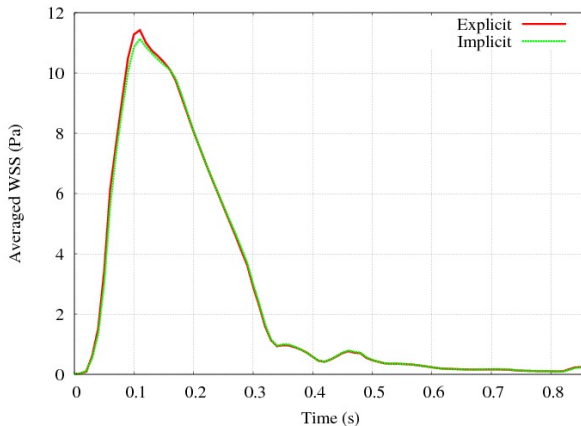
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions



¡El modelo implícito consume 8 veces más tiempo que el modelo explícito!



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Condiciones de contorno

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

- La autoregulación es un mecanismo del sistema cardiovascular para garantizar la aportación de sangre en las distintas ramas arteriales.
- En condiciones normales, la demanda de sangre es constante en cada rama, y viene determinada por las necesidades de nutrientes de los miembros distales.
- Las patologías en las zonas próximas activan los mecanismos de autorregulación, para satisfacer el flujo demandado en las zonas distales.
- El concepto de imponer las impedancias como condiciones de contorno realistas es atractivo pues aquellas son representativas de las acciones (de presión y caudal) ejercidas por el “resto” del sistema vascular.



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Condiciones de contorno: autorregulación + impedancias

FSI coupling strategies in cardiovascular system

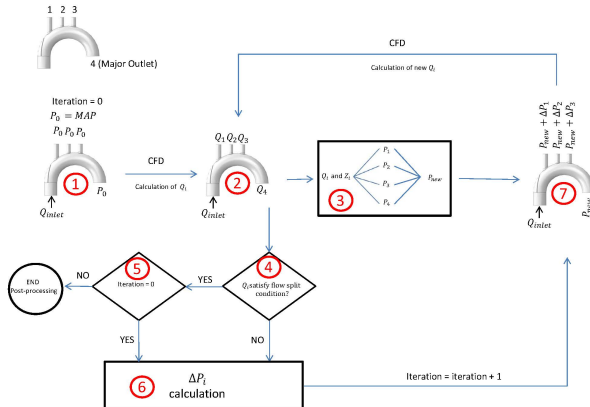
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Índice

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

1 Introduction

2 Models

3 Results

4 Conclusions



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Resultados. Disección

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

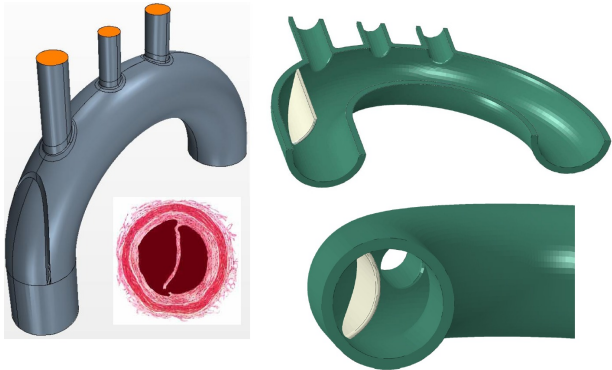
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Resultados. Disección

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

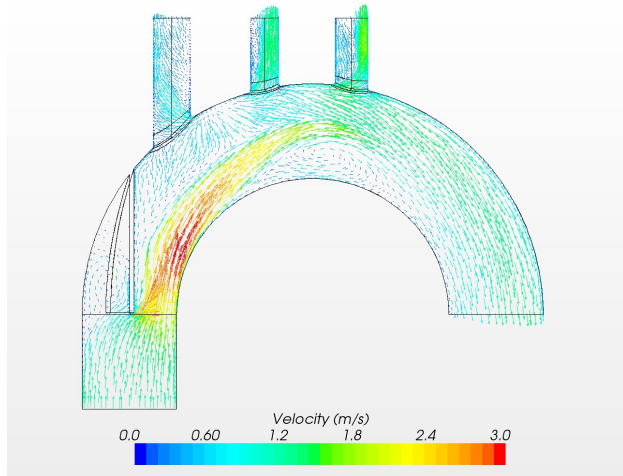
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Resultados. Disección

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

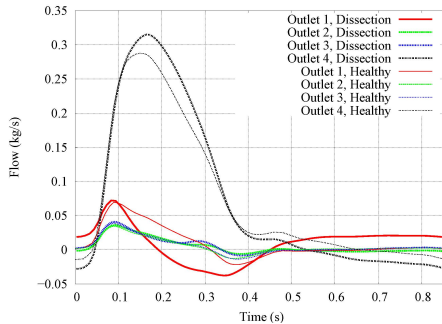
D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Índice

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

1 Introduction

2 Models

3 Results

4 Conclusions



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

Conclusiones

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

- Se han desarrollado diversas simulaciones del flujo sanguíneo, considerando su interacción con la pared arterial.
- Se han utilizado para ello los programas Abaqus y STAR-CCM+, que cada uno en su ámbito, permiten utilizar modelos no lineales avanzados y robustos.
- Se propone una metodología para establecer condiciones de contorno realistas, basadas en los conceptos de autorregulación e impedancia del sistema cardiovascular.
- La falta de estabilidad que presentan los metodos de acoplamiento explícito en FSI, se evita cuando en la transmisión de información fluido-estructura se omite la velocidad de la pared arterial.
- De esta forma los tiempos de calculo se rebajan en un orden de magnitud, lo que mejora considerablemente la viabilidad de este tipo de simulaciones.



POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

FSI coupling
strategies in
cardiovascular
system

D.Afkari,
F.Gabaldón &
J.Rodríguez

Introduction

Models

Results

Conclusions

Comparison of implicit and explicit FSI coupling strategies in cardiovascular system

Damon Afkari^{*,**}, Felipe Gabaldón^{*} and Javier Rodríguez Soler^{**}

^{*}Universidad Politécnica de Madrid

^{**}PRINCIPIA S.A.

IV Reunión Capítulo Español ESB
Valencia, November 21st 2014